

# AIとフォーマルメソッドを使った 宇宙ステーションの異常予兆検知

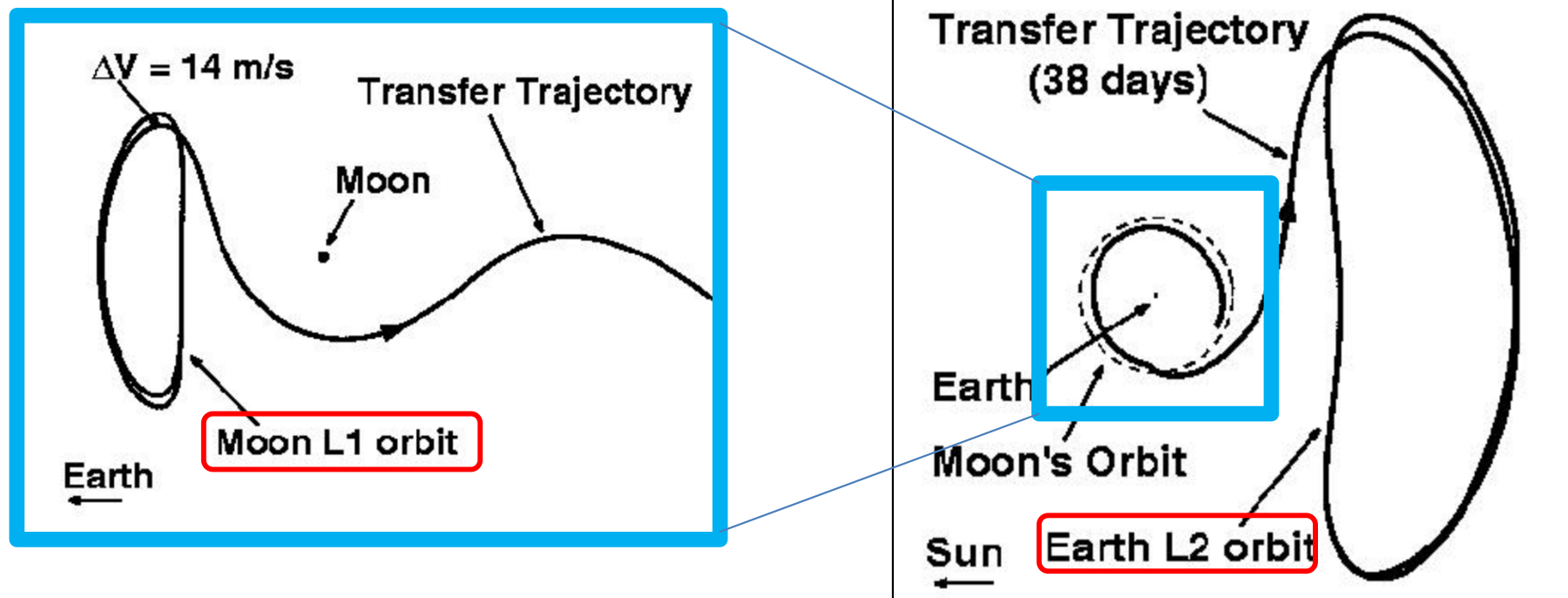
Patent 7007529 (Japan, USA, China and Korea)

野本秀樹

[nomoto.hideki@jamss.co.jp](mailto:nomoto.hideki@jamss.co.jp)

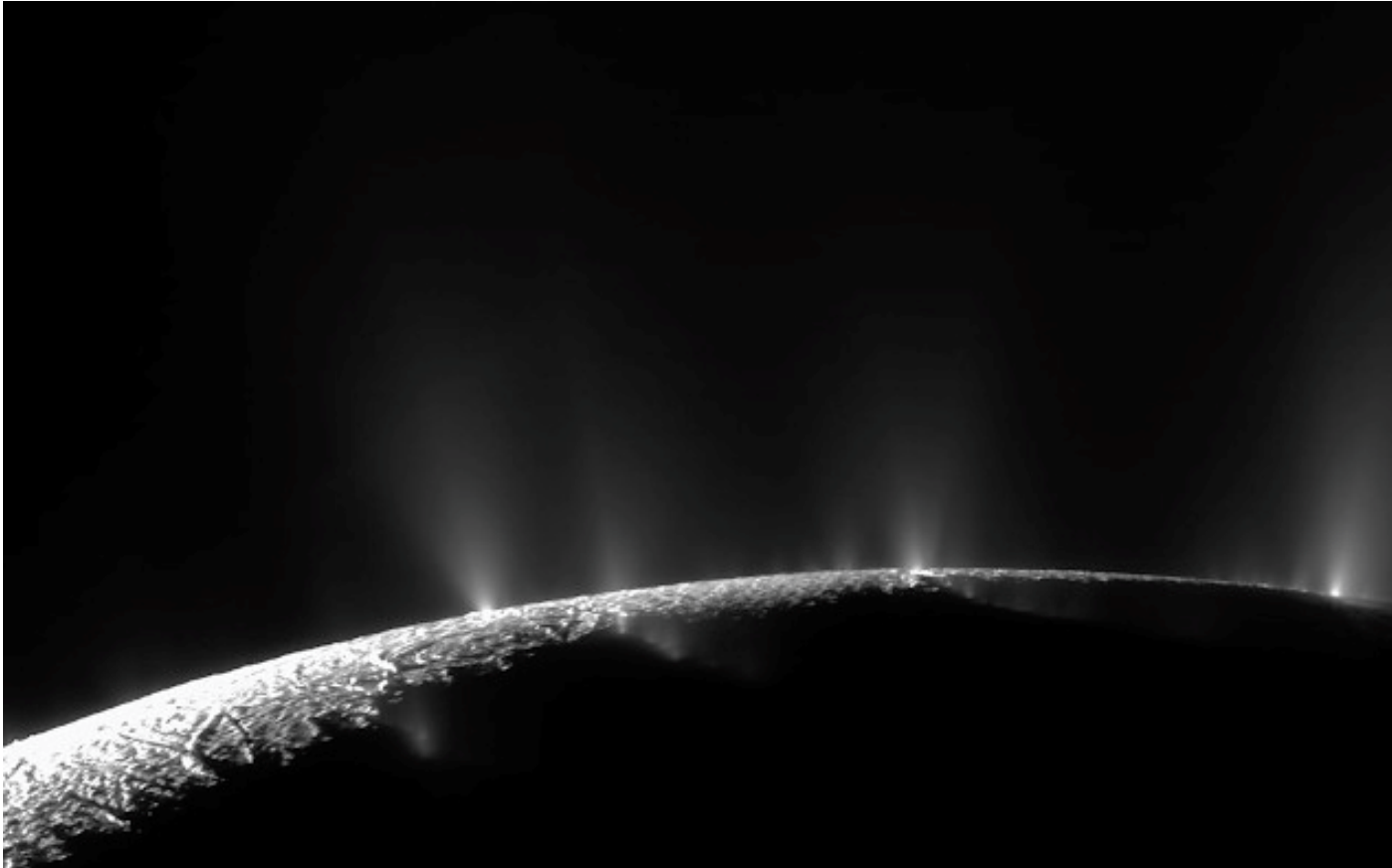
有人宇宙システム株式会社  
先端技術研究センター長

# 今世紀初頭の大発見: Interplanetary Superhighway



*"The Lunar L1 Gateway: Portal to the Stars and Beyond",  
M.W. Lo and S.D. Ross, 2001, AIAA Space 2001 Conference*

# 土星に生命？



提供：[NASA/JPL/Space Science Institute](https://www.nasa.gov/jpl/space-science-institute)

2015年に米国の人工衛星**カッシーニ**が撮影した、土星を回る衛星**エンケルドス**から吹き上がる間欠泉

この中に**大量のリン**が含まれていることが、昨年明らかになった。これは**温泉**がある証拠

既に、塩分、二酸化炭素、アンモニア、複雑な有機物は検出済み

# 惑星探査の安全

## ➤ 大きな通信ディレイ

- 火星：13分
- 木星：40分
- 土星：80分

## ➤ 極めて長いミッション

- 火星：240日
- 木星：780日
- 土星：1560日

# 惑星探査の安全

## ➤ 大きな通信ディレイ

- 火星：13分
- 木星：40分
- 土星：80分

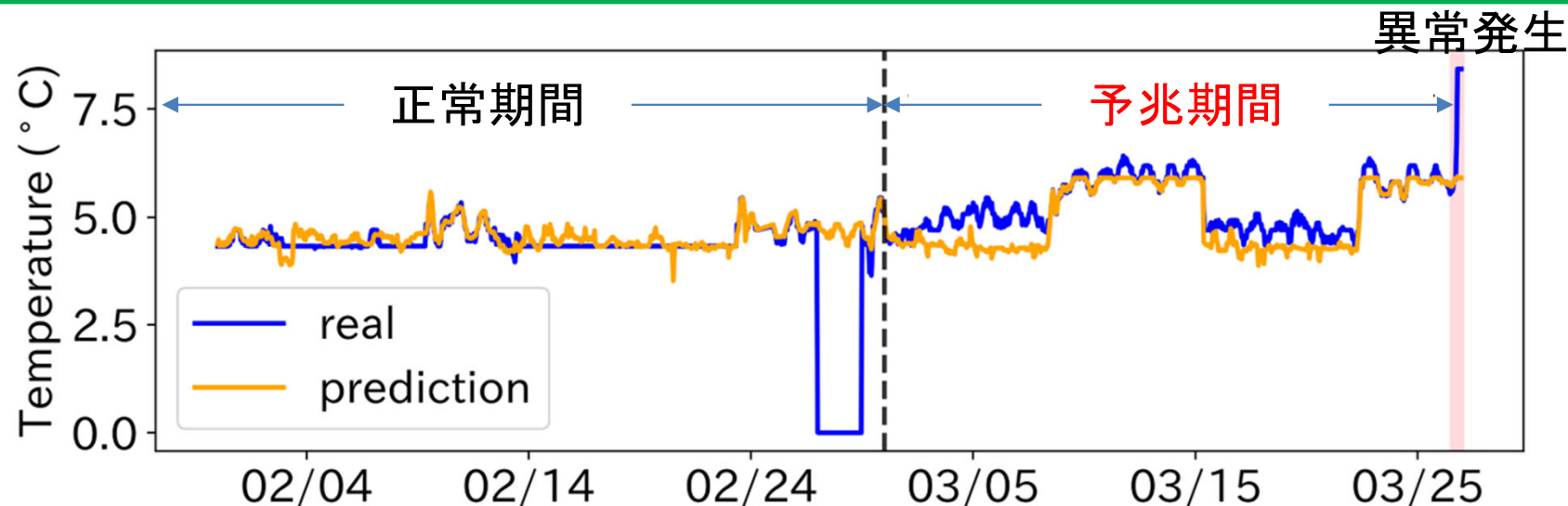
実際に使用不能になる前に、**異常の予兆**を検知することが必要

## ➤ 極めて長いミッション

- 火星：240日
- 木星：780日
- 土星：1560日

機器寿命を長くするため、**異常の予兆**が出た機器を休ませることが必要

# どのように**異常の予兆**を検知？



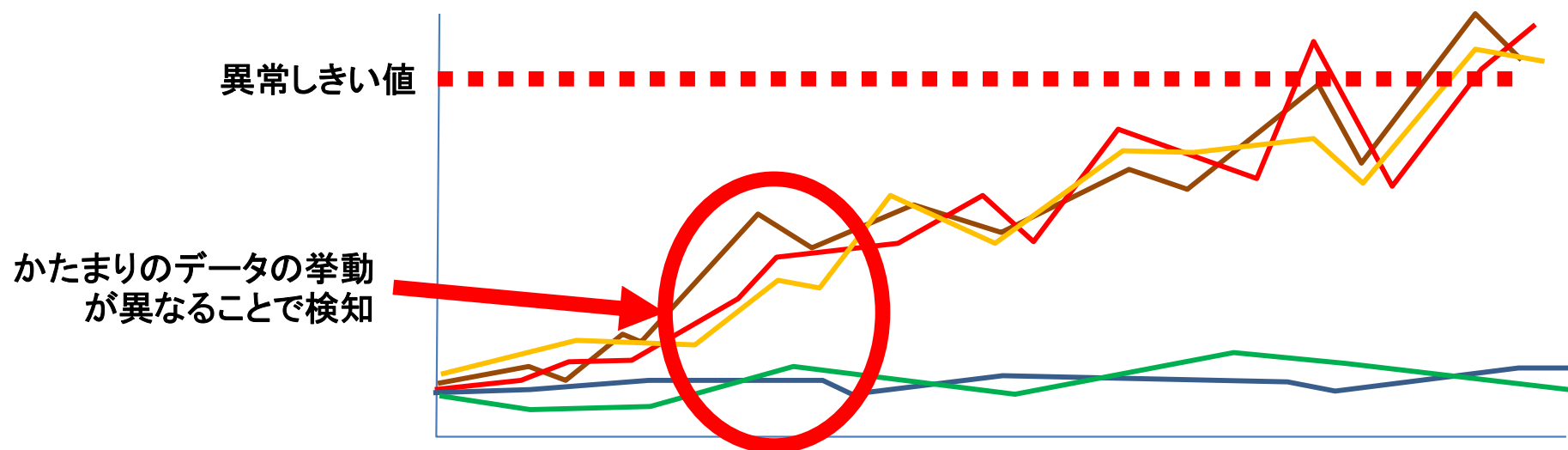
Iino, S., et. al., "Explainable symptom detection in telemetry of ISS with Random Forest and SpecTRM", 2021, IEEE Aerospace Conference

- ① 正常データを学習 (機会学習)
- ② 最新値を予測
- ③ 予測値と観測値の差が**異常予兆**の度合い

# 人間の異常予兆検知方法

## ➤ 人間は、複数データの組み合わせから検知

- 宇宙ステーションでは、サブシステム毎に数百のデータ有り
- 管制官は、複数データのかたまりの挙動が崩れることで検知



# AIによる予兆検知

- 
- 人間のように、データの組み合わせで検知したい
    - 各サブシステム毎に数百のデータ



# AIによる予兆検知

- 人間のように、データの組み合わせで検知したい
  - 各サブシステム毎に数百のデータ
- しかし、数百個のデータの組み合わせでの検知は**決定論的ロジックでは不可能**
  - 決定論的総当たりロジックにより300個のデータの組み合わせを監視しようとする、 $2.03e+90$  行のコードが必要  
(宇宙全体の原子の数は、たかだか $e80$ 個しかない)

# AIによる予兆検知

- 人間のように、データの組み合わせで検知したい
  - 各サブシステム毎に数百のデータ
- しかし、数百個のデータの組み合わせでの検知は**決定論的ロジックでは不可能**
  - 決定論的総当たりロジックにより300個のデータの組み合わせを監視しようとする、 $2.03e+90$  行のコードが必要
  - (宇宙全体の原子の数は、たかだか $e80$ 個しかない)
- AIを使う必要がある

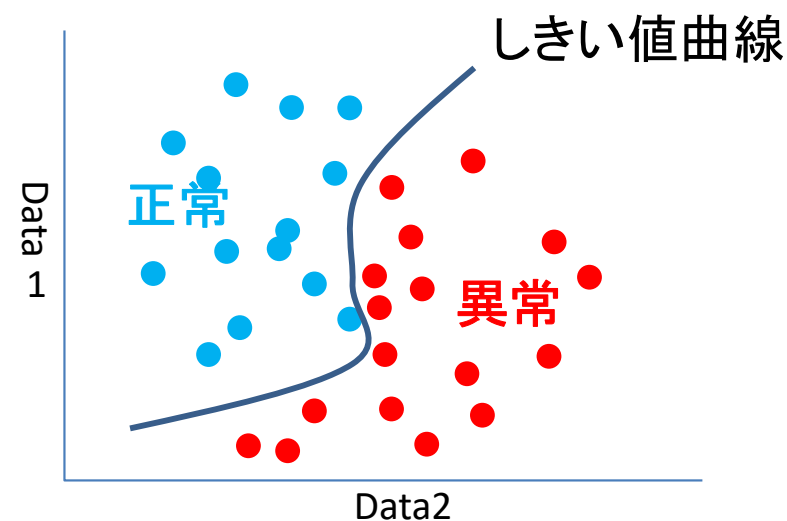
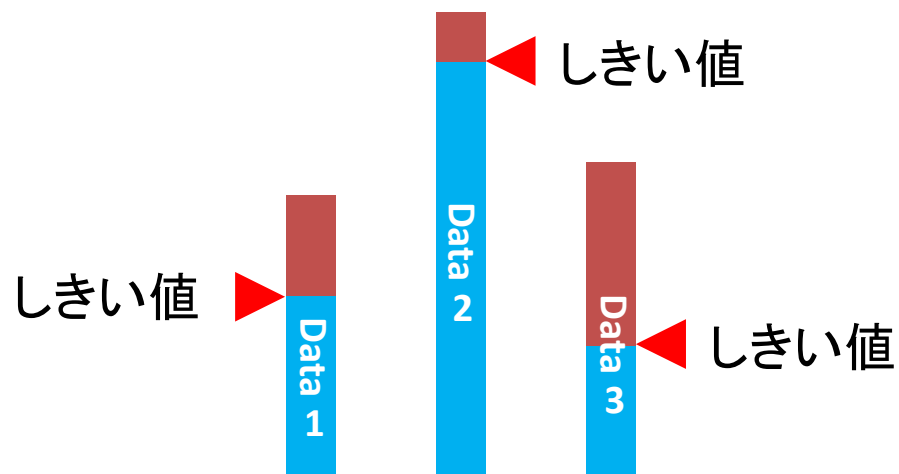
# AIによる予兆検知

## ➤ AIは、データを組み合わせで評価する

(しかし、総当たりロジックではない)

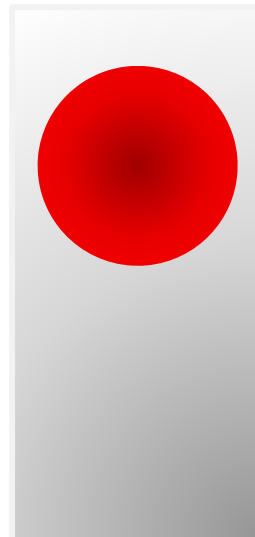
従来の異常検出方法:  
各データ毎に異なるしきい値

AIによる検知:  
複数データの組み合わせ



# AIによる予兆検知

- 我々に必要なのは、**信頼できるAI**

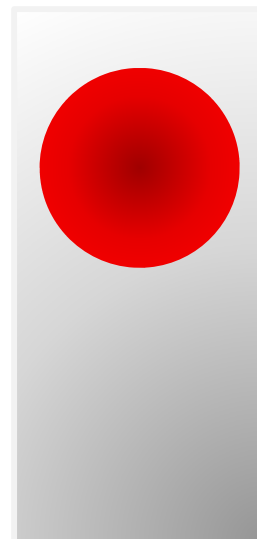


“ちょっと待ってください。ユニットAE-35が72時間以内に100%の確立で故障します。”

- 2001年宇宙の旅 AIマシンHALの異常予兆検知

# AIによる予兆検知

- 我々に必要なのは、**信頼できるAI**

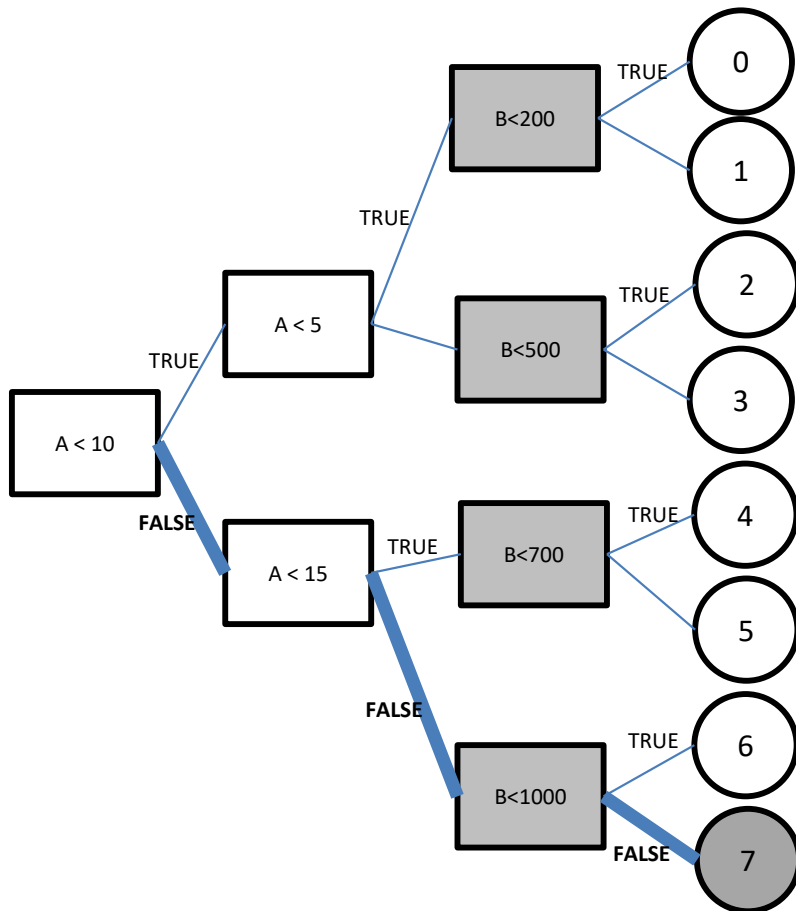


何故そう予測したのか  
根拠がわからない

“ちょっと待ってください。ユニットAE-35が72時間以内に100%の確立で故障します。”

- 2001年宇宙の旅 AIマシンHALの異常予兆検知

# AIの中身 (Random Forest)



➤ 予測は、ディシジョンツリーのパスに沿って行う

➤ **葉の順序 (A→B) が重要**

➤ 最適な葉の順序を学習

# フォーマルメソッドによる予測根拠

## Formal Model

= normal	A < 10		T	T	T	F	F
	B < 200	T	T	F	F	T	F
	C > 50	T	F	T	F	F	T
= abnormal	A < 10	F	F				
	B < 200	F	F				
	C > 50	F	T				

学習データを

フォーマルメソッド言語  
(SpecTRM) に翻訳する

# フォーマルメソッドによる予測根拠

## Formal Model

= normal	A < 10	T	T	T	T	F	F
	B < 200	T	T	F	F	T	F
	C > 50	T	F	T	F	F	T
= abnormal	A < 10	F	F				
	B < 200	F	F				
	C > 50	F	T				

## Model Checking Result

= Not learned	A < 10	F
	B < 200	T
	C > 50	T
= symptom (normal or abnormal)	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	T
= Abnormal only	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	F



# フォーマルメソッドによる予測根拠

Formal Model

= normal	A < 10	T	T	T	T	F
= abnormal	A < 10	F	F			
	B < 200	F	F			
	C > 50	F	T			

このデータは未学習

Model Checking Result

= Not learned	A < 10	F
	B < 200	T
	C > 50	T
= symptom (normal or abnormal)	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	T
= Abnormal only	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	F

# フォーマルメソッドによる予測根拠

Formal Model

= normal	A < 10	T	T	T	T	F	F
	B < 200	T	T	F	F	T	F
	C > 50	T	F	T	F	F	T
= abno	A < 10	F	F				
	B < 200						
	C > 50						

このデータは正常と異常のはざま

Model Checking Result

= Not learned	A < 10	F
	B < 200	T
	C > 50	T
= symptom (normal or abnormal)	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	T
= Abnormal only	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	F

# フォーマルメソッドによる予測根拠

Formal Model

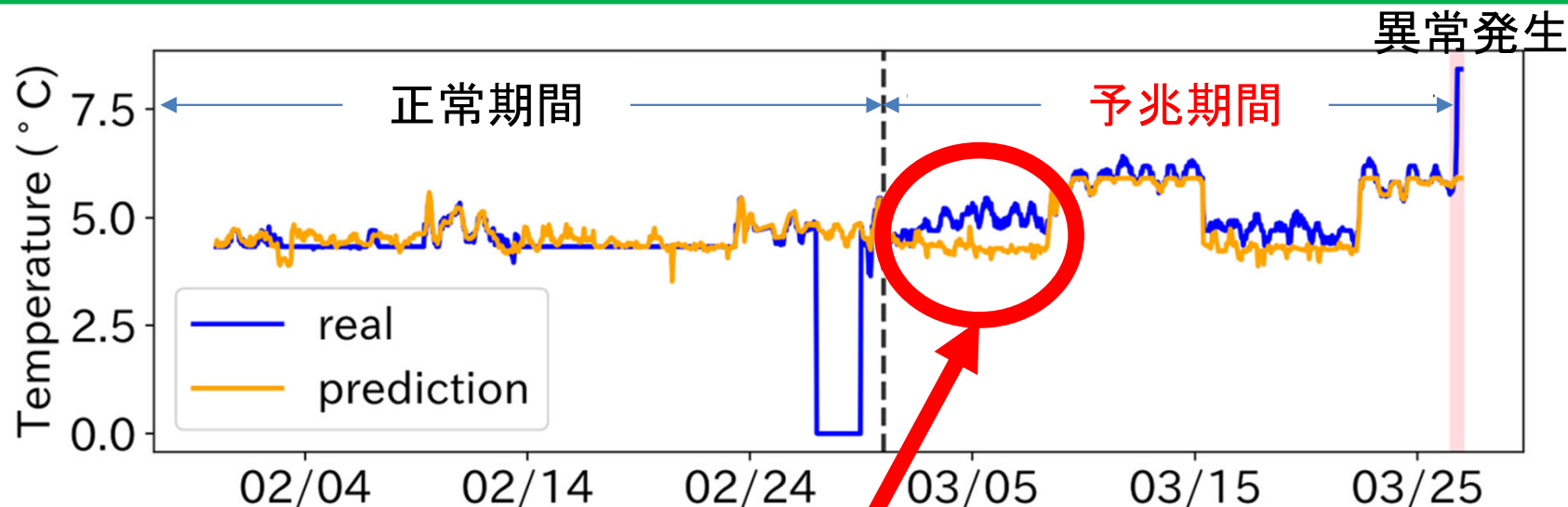
= normal	A < 10	T	T	T	T	F	F
	B < 200	T	T	F	F	T	F
	C > 50	T	F	T	F	F	T
= abnormal	A < 10	F	F				
	B < 200	F	F				
	C > 50	F	T				

Model Checking Result

= Not learned	A < 10	F
	B < 200	T
	C > 50	T
= symptom (normal or abnormal)	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	T
= Abnormal only	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	F

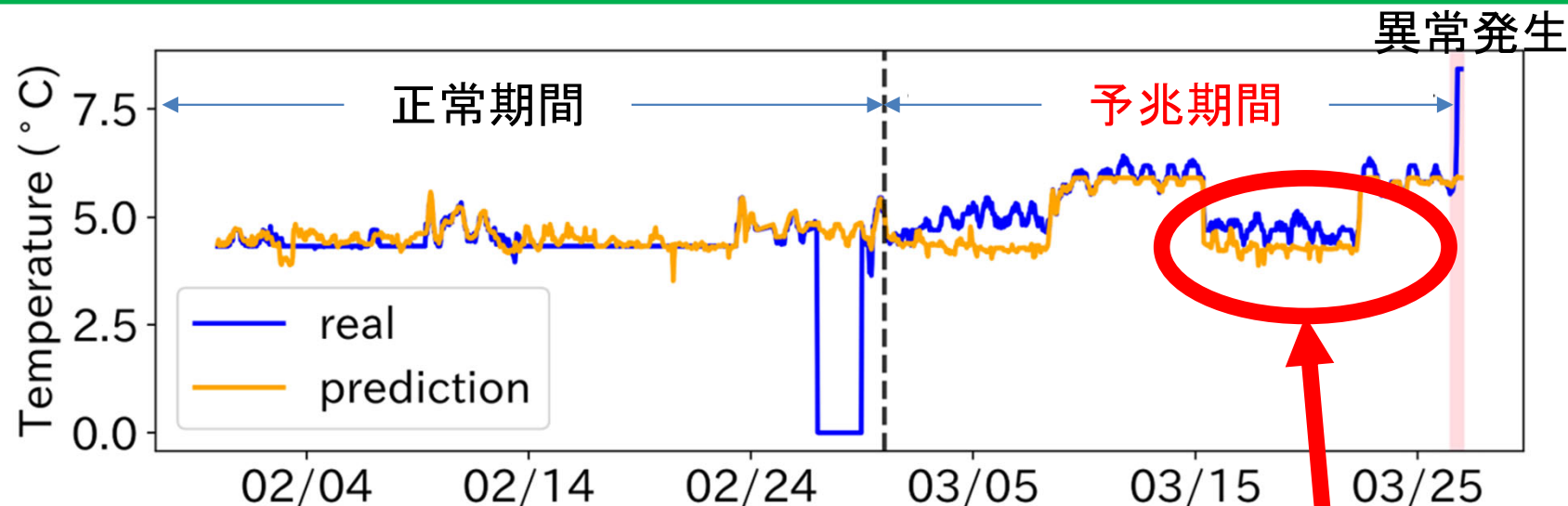
このデータは異常特有

# フォーマルメソッドによる予測根拠



(例) 予兆を検出  
何故なら、この組み合わせを学習していない

# フォーマルメソッドによる予測根拠



(例) 予兆を検出  
なぜなら、この組み合わせは異常時特有

# まとめ

- 惑星探査には**異常予兆**検知が必要
- AIを使わないと大量のデータの組み合わせによる予兆検知はできない
  - 決定論的ロジックでは天文学的行数と実行時間が必要
  - AIによって、実用可能な大きさと速度が得られる
- AIは**予測根拠を示してくれない**
  - そのまま信じると危険
  - フォーマルメソッドにより**予測根拠を示し、説明責任を果たす**